

# **POTENCIALIDADES DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL Y SU TECNOLOGÍA EN EL MARCO DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN**

**Antonio Aguado, Marilda Barra, José Manuel Gómez-Soberón (UPC)**

**Belén González (UdC)**

## **Resumen**

En el presente artículo se hace, en primer lugar, una revisión de la evolución del planteamiento de sostenibilidad en el Sector de la Construcción, a través de la visualización del ciclo de vida que constituye el mismo. Con posterioridad se abordan diferentes aspectos de incidir en la misma a través de las diferentes etapas del proceso constructivo para, finalmente, enfatizar en los aspectos estructurales del hormigón reciclado y las posibilidades de implantación práctica. Esta revisión se hace a partir de la experiencia española, principalmente de investigación, generada en los últimos años.

## **Summary**

This paper presents, first of all, a revision of the sustainability's outlining evolution in the Construction area, by the visualisation of it's life cycle. Then, we approach different ways of affecting it by the different steps of the Construction's process for, finally, emphasize the recycled concrete's structural characteristics and it's practical implantation's possibilities. This revision is made from the Spanish experience, mainly the investigation one, generated in the last years.

## **1.- INTRODUCCIÓN**

La conciencia por temas medioambientales y la difusión del término de sostenibilidad se han incorporado muy rápidamente en la conciencia social y profesional, de los ciudadanos y técnicos.

Por otro lado, el Sector de la Construcción, dada la idiosincrasia del mismo, presenta una gran inercia a cambios, LABEIN (2003), lo que contribuye a la percepción social negativa sobre el medio ambiente que mantienen amplios sectores de la Sociedad. Sin entrar a valorar las bases de esa percepción, sí que hay que asumir que se debe actuar para cambiar esa tendencia dentro de un planteamiento estratégico de sector. Aunque con frecuencia se echa en falta políticas colectivas en esta dirección, si que existen planteamientos más personales o profesionales en el subsector del hormigón, encontrándose un numeroso grupo de personas y entidades.

Ante la invitación, al primer firmante, de presentar una ponencia a las Jornadas de ACHE tituladas “*Proyecto y Ejecución de estructuras de hormigón*” (Madrid, 17 y 18 de junio de 2003) con el mismo título que el presente artículo, este extendió la invitación a diversos investigadores que, en los últimos años, han incidido en los aspectos estructurales del hormigón reciclado. El carácter pionero de estas investigaciones, ante la falta de realizaciones de significación, permite explicar las potencialidades de una vertiente del hormigón estructural reciclado en la sostenibilidad de la construcción.

Este planteamiento sería insuficiente, en un planteamiento global del ciclo de vida que representa el Sector de la Construcción. Por ello se hace asimismo una revisión de las otras etapas del proceso constructivo, revisando las potencialidades que hay en cada una de ellas. Esta revisión se hace fundamentalmente desde la experiencia de la investigación, si bien se articulan experiencias profesionales cuando estas existen.

## 2.- LA EVOLUCIÓN DE LA PERCEPCIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD EN EL SECTOR

El concepto de sostenibilidad en la acepción mundialmente aceptada es relativamente reciente<sup>1</sup>. Sin embargo ya existen precedentes en el Sector de la Construcción, adaptado para el hormigón de la existencia de un principio de ciclo, en el plantear aspectos globales y equilibrados. Así es conocido el pentágono de la figura 1, planteados en trabajos del CEB y, que en España, divulgó García Meseguer (1983) en diferentes obras y conferencias

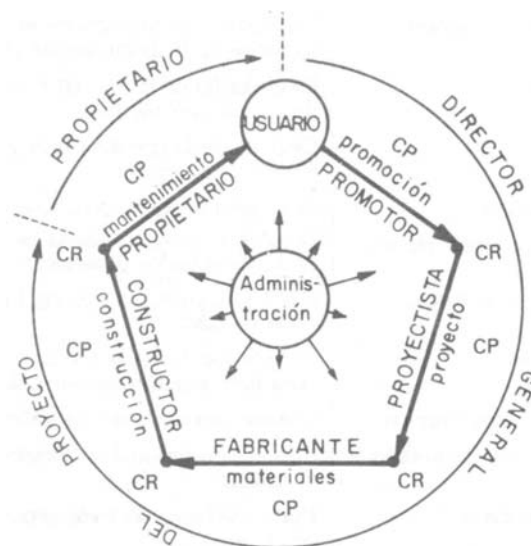
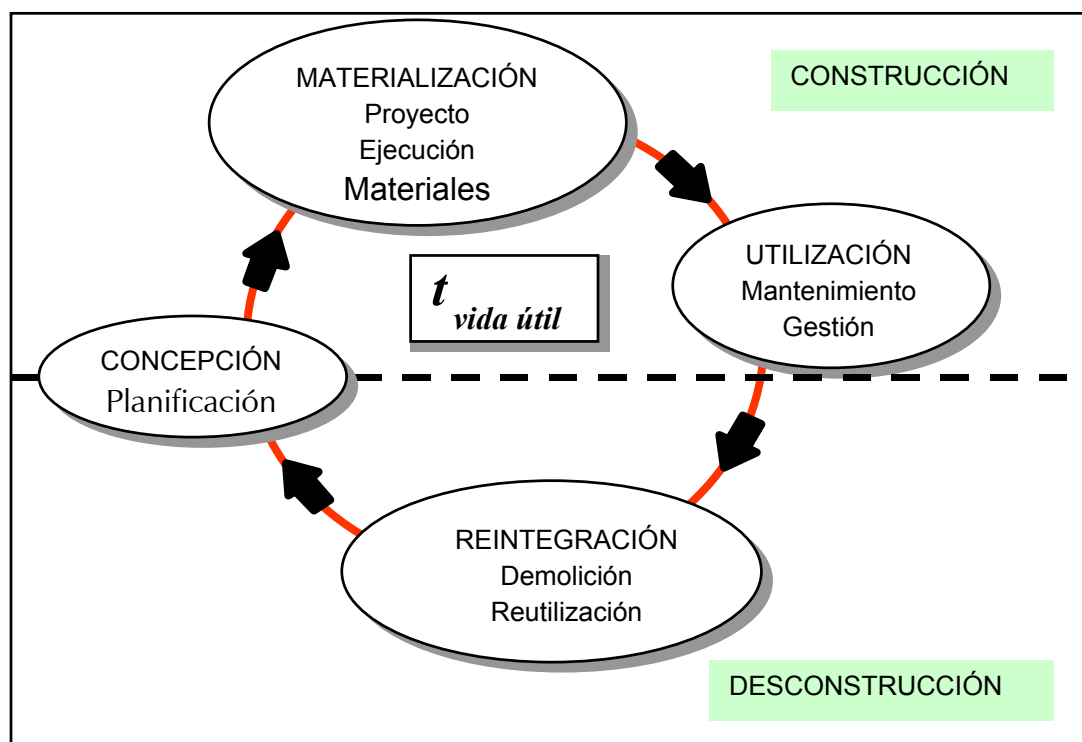


Figura 1.- Pentágono del Sector de la construcción

<sup>1</sup> Informe Bruntland de 1987 para la ONU, en el que se define el “*Desarrollo sostenible como aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades*”

Resaltando los aspectos positivos de la citada figura, ya que se articula un ciclo, muestra algunas limitaciones ya que no se visualiza bien los aspectos de explicitación de la vida útil, aspectos medioambientales, etc.. No obstante hay que valorar muy positivamente la aportación conceptual de la misma.

Con posterioridad, Aguado y Casanova (1997), dentro del capítulo 1 del Manual de demolición de estructuras de hormigón GEHO ATEP, que supuso el primer documento propio conjunto antes de la fusión de ambas asociaciones, presentan la figura 2, en las que manteniendo la filosofía del ciclo, le articulan como tal, al incluir la etapa de reintegración y, consecuentemente tener mucho más presente los aspectos ambientales. Asimismo, remarcan la importancia de explicitar la vida útil de la estructura, lo que permite hacer planteamientos más integrados de las diferentes etapas, en las que se articulen de forma satisfactoria las interfases entre las mismas, así como los límites de los sistemas, cara a comparar el grado de sostenibilidad de las distintas soluciones que puedan definirse para resolver un determinado problema.



*Figura 1.- Visualización del Ciclo de vida de la Construcción*

Todos estos planteamiento, arropados por el origen del término sostenibilidad, abordan el problema desde un punto de vista de análisis global, esto es, como si todos fuésemos jefes de estado y estuviésemos analizando la evolución del CO<sub>2</sub> (efectos globales). Ahora bien, la sostenibilidad también puede verse desde otros puntos de vista, que siguiendo el paralelismo de los efectos, abarquen a los efectos regionales y locales (e incluso, en este caso, a los efectos personales, esto es, sostenibilidad personal o familiar).

La disfunción existente en plantear el punto de análisis de la sostenibilidad hace, que en la actualidad, se produzca un choque de intereses entre los distintos agentes

intervinientes y, que consecuentemente, la implantación real de la sostenibilidad sea lenta. ¿Quién va a utilizar áridos procedentes de reciclados de estructuras de hormigón, si los áridos naturales de 1ª extracción son más baratos?. La respuesta sólo puede ser positiva si se incorporan otros componentes de análisis y abarcan a todo el ciclo, esto es, se superan los puntos de vista personales, locales o regionales y, consecuentemente priman los aspectos más globales.

Por todo ello, parece lógico plantear políticas trasnacionales, que luego se cumplan, en la dirección apuntada de sostenibilidad. Ello se traducirá en el Sector de la Construcción en que las propiedades y/o promotores asuman esa políticas y, articulen las medidas correspondientes desde las primeras etapas del ciclo de vida, esto es desde la etapa de planificación.

### **3.- CONTRIBUCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN EN LA SOSTENIBILIDAD**

Una vez que se establezca que la sostenibilidad, traducida como valor para el conjunto de la Sociedad, es el indicador final de estudio comparativo de soluciones, habrá que revisar si se disponen en la actualidad de base suficiente para abordar ese reto con éxito. En lo que sigue se hace una breve revisión al respecto, mostrando el optimismo sobre la capacidad técnica y profesional para resolver los retos planteados.

En relación a las técnicas de análisis existen planteamientos basados en el Análisis de Valor (Ormazabal, 2002). Las mismas, extrapolación de la experiencia industrial a etapas más específicas del proceso, permiten comparar el valor de distintas soluciones a un mismo problema con indicadores correspondientes a diferentes planos de requerimientos: costes, plazos, aspectos técnicos, durabilidad, aspectos sociales y culturales, medioambientales, seguridad. En estas técnicas se combinan variables y atributos utilizando tanto la matemática convencional como la matemática difusa, manteniendo el rigor necesario para una toma de decisiones responsable.

Por otro lado, desde el punto de vista conceptual, un aspecto fundamental de la figura 2 anteriormente mostrada es la necesidad de explicitar la vida útil de la estructura, como parámetro previo y punto de partida, base del establecimiento de especificaciones posteriores, tal como señala G. Aparicio (1999). El mismo aporta un interesante modelo en el utiliza el término de reponibilidad para la cuantificación de la vida útil. Esta cuantificación y, su consecuente incorporación en la EHE, se muestra como un paso imprescindible para plantear soluciones sostenibles desde un punto de vista global y no sólo desde los planteamientos separativos actuales como suma de intereses particulares de las distintas empresas y técnicos que intervienen en las distintas etapas del proceso.

Estos planteamientos pueden, finalmente, olvidar el usuario final de nuestras obras que son los ciudadanos y, consecuentemente, la visión global de la sociedad respecto a la sostenibilidad. En este sentido, en especial en la obra pública, existe cierta confusión en entender quien es el usuario final y a veces se articula más pensando en el usuario final interpuesto que, en la obra pública son los técnicos de alto grado de la administración correspondiente.

Para concretar esta reflexión, en el ámbito del proyecto la sostenibilidad, entendida desde ese punto de vista global, debería conducir, generalmente, a plantear soluciones estructurales que requiriesen el consumo de menores cantidades de recursos no renovables. Esto puede entrar en contradicción directa con otros aspectos y no sólo criterios económicos. Así, por ejemplo, de forma cualitativa se cometa a continuación el caso de una cercha de cubierta de una nave industrial.

En la España de la postguerra y décadas posteriores, muchas de las cubiertas eran realizadas con estructuras en celosía de hormigón armado simulando en forma las cerchas metálicas, tal como se muestra en la figura 3a, con posterioridad se fue a cerchas de hormigón pretensado, con huecos en el alma (figura 3b), para finalmente evolucionar a esta misma solución sin huecos (figura 3c)



*Figura 3.- Evolución de cerchas de cubierta:*

- a.- Hormigón armado*
- b.- Hormigón pretensado con huecos en el alma*
- c.- Hormigón pretensado sin huecos en el alma*

En esa evolución, siempre ha primado los criterios económicos, principalmente. Así, en las primeras épocas, donde la mano de obra era barata y escaso el cemento (ya muchos no recuerdan la época del estraperlo con este material), se planteaban soluciones de mínimo consumo de material, aumentando el canto y con secciones de pequeño ancho. Esto conlleva ciertos problemas de durabilidad, al implicar mayor superficie expuesta, si bien no se conocía a priori si la vida real de las mismas era superior (igual o inferior) a la vida útil de la cercha, ya que esta no se explicitaba. De ahí surge la necesidad de explicitar la vida útil de las estructuras, cosa que aún nuestra normativa no incluye, ya que tiene repercusión sobre las diferentes actuaciones posteriores del ciclo de vida.

El sector del cemento consciente de la aportación del mismo en el efecto invernadero, a través de las emisiones de CO<sub>2</sub> (por cada tonelada de cemento tipo I

producido se emiten en el entorno de 800 a 900 Kg de CO<sub>2</sub>) o, de los efectos locales que la industria puede implicar (polvos), han tomado medidas para reducir las mismas, a través de sus órganos de representación OFICEMEN o IECA. Con ello se ha llegado a reducir de forma significativa (mediante filtros) los efectos locales superándose la antigua imagen de polvo en el entorno de las fábricas o bien incorporando diversos tipos de combustibles, que en el balance energético y medioambiental repercutan en menor medida en los efectos globales, Mora, (2002).

Para hacer comparable estos estudios ambientales, a través de los diversos efectos se ha potenciado en los últimos años una herramienta de evaluación como es el Análisis de Ciclo de Vida, introduciendo aspectos económicos o no. En el ámbito nacional, recientemente se presentó la tesis doctoral de Arnaldo Cardim (2001), en la que se hacía un análisis de ciclo de vida de diferentes inventarios de cemento, existentes a nivel internacional. En dicho trabajo se ponía en evidencia las dispersiones existentes y la imprecisiones en la definición de los límites del sistema, lo que dificulta la comparación de soluciones tecnológicas con distintos materiales que con frecuencia aparecen en publicaciones técnicas. En este trabajo se hacía una propuesta para lo que podría ser la base de un inventario nacional de los cementos españoles. Dicha tesis, fue realizada en el contexto de un convenio entre la UPC y el IECA.

Los inventarios deben hacerse extensivo a todos los componentes y etapas. Así mientras existen trabajos importantes respecto a las disponibilidades de áridos reciclados y existe una política en esa dirección con un crecimiento rápido del número de plantas en el ámbito nacional, no existen inventarios disponibles respecto a áridos reciclados, mientras que son numerosos los correspondientes a aceros. En esta dirección está desarrollando su tesis doctoral Beatriz Estévez. dirigida por los profesores A. Aguado y A. Josa, habiéndose definido el inventario de los áridos reciclados de las plantas establecidas en Cataluña. Estévez et al (2002).

En la etapa de ejecución los avances son significativos, tanto en lo que supone plantas de hormigón preparado, como en la propia obra, por ejemplo, depósitos de decantación en túneles con hormigón proyectado, etc,. Además existe la tendencia de la construcción seca, en la que la industrialización va ganando camino, motivado no sólo por los aspectos ambientales sino económicos de aumento de competitividad.

Por otro lado, cabe señalar que en las empresas constructoras se está abriendo caminos, planteamientos integrados de sistemas de control de calidad, ambiental y seguridad en la que una racionalización de los procedimientos a utilizar según las normativas ISO correspondientes permiten dar respuesta con fiabilidad en los aspectos señalados, con menor número de documentación. RUBAU (2002)

Por último, una consecuencia de la no visualización del ciclo de vida que supone el sector de la construcción, es el inadecuado tratamiento de la gestión del conocimiento que se genera en el proyecto, construcción y explotación de una estructura. Ello, en la actualidad sólo permite una capitalización personal del conocimiento y sólo en parte, pero no una capitalización de empresa(s), con la consecuente pérdida de competitividad de las mismas (o limitación de mercados), Nuñez y Aguado (2003).

#### 4.- LA INVESTIGACIÓN EN ESPAÑA EN HORMIGÓN ESTRUCTURAL RECICLADO

Sí una de las preocupaciones fundamentales de la sostenibilidad es el uso racional de los recursos disponible, es importante ahondar en la dirección del árido reciclado procedente de estructuras de hormigón como una solución de futuro. Por otro lado, dado el carácter de la asociación ACHE orientado al hormigón estructural parece oportuno revisar la posibilidad real en el ámbito nacional del empleo de este tipo de árido y el comportamiento estructural de hormigones realizados con los mismos. A falta de experiencias masivas significativas, esta revisión se realiza a través de las tesis doctorales leídas en los últimos años que dan respuesta a estas inquietudes.

Los estudios de hormigones reciclados (HR) con sustitución parcial de áridos naturales por áridos reciclados procedentes de hormigón (ARHC) prometen un camino factible para su práctica, una respuesta a factores de actualidad, satisface una demanda, logra un ahorro de energía, mejora las condiciones medioambientales y da solución para los 200 millones de toneladas al año de éstos desechos que genera la Unión Europea, Grübl, W. (1999), Hansen, T. C. and Bøegh E., (1995), Lauritzen, E. K. and Jannerup, M. (1993).

##### Tesis doctoral Marilda Barra (1996)

Esta tesis doctoral, pionera en el ámbito nacional muestra que con áridos reciclados se pueden producir hormigones de buenas prestaciones en resistencia y durabilidad, lo cual requiere el conocimiento de las características del árido reciclado y ajustar a ellas los procesos de dosificación y producción.

La sustitución del árido grueso convencional por árido reciclado cambia las ecuaciones que representan las leyes de comportamiento de los hormigones. Así en la figura 4 se muestran las leyes de Abrams sobre la evolución de la resistencia a compresión ( a 28 días) en función de la relación agua/cemento y la ley de Lyse sobre evolución de la cantidad de árido requerida para una determinada trabajabilidad (m) en función, asimismo, de la relación agua/cemento.

En ambos casos se presentan dichas leyes para hormigones convencionales (HC) y para hormigones con áridos reciclados (HaR). Los resultados presentados en la citada figura corresponden a hormigones con árido convencional y hormigones en los que la fracción mayor a 4 mm, ha sido sustituida por árido reciclado.

En esta figura puede verse que para obtener hormigones con la misma resistencia, en el hormigón de árido reciclado la relación agua /cemento (A/C) deberá ser menor; mientras que la cantidad de áridos (m) para una determinada relación agua /cemento (A/C) es menor, de lo que se deriva que el consumo de cemento sea mayor. El incremento del consumo de cemento será tanto mayor cuanto mayor sea la resistencia especificada para el hormigón. La diferencia entre el consumo de cemento es prácticamente nula para hormigones de bajas resistencias ( $f_c < 25\text{MPa}$ ) y aumenta progresivamente con el aumento de la resistencia (del orden de 20% para  $f_c > 50\text{MPa}$ ).

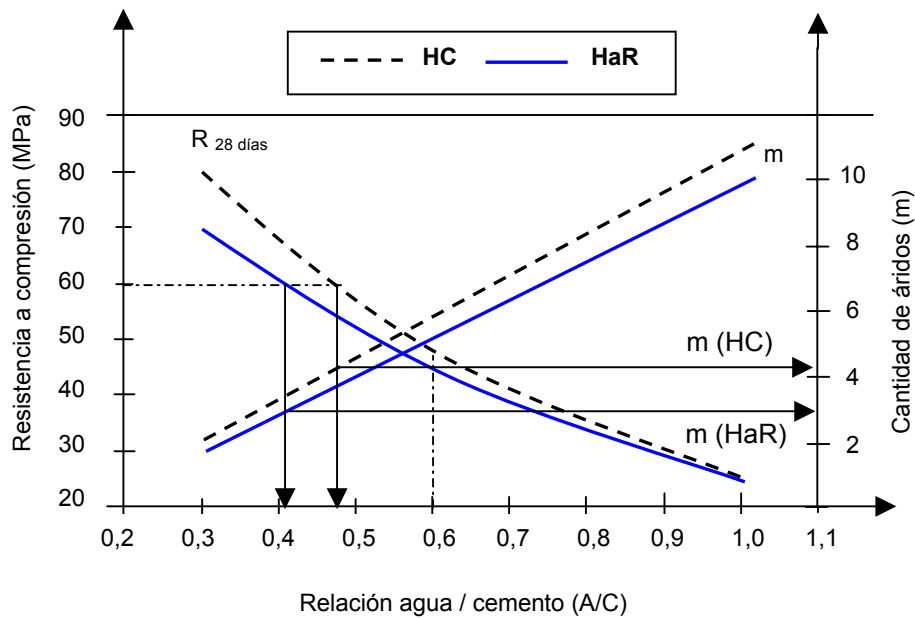


Figura 4.- Leyes de Abrams y Lyse para hormigón convencional y reciclado

Con los valores de la cantidad de áridos que se obtiene en la figura 4, se puede entrar en la figura 5, lo que permite obtener el consumo de cemento por  $\text{m}^3$  de hormigón (C) para los dos tipos de hormigones observándose unas diferencias poco significativas en los coeficientes  $k_5$  y  $k_6$ . Mientras tanto, para un hormigón de las mismas características de resistencia y trabajabilidad, la cantidad de árido (m) es menor en el HaR (figura 4), lo que determina un mayor consumo de cemento (figura 5).

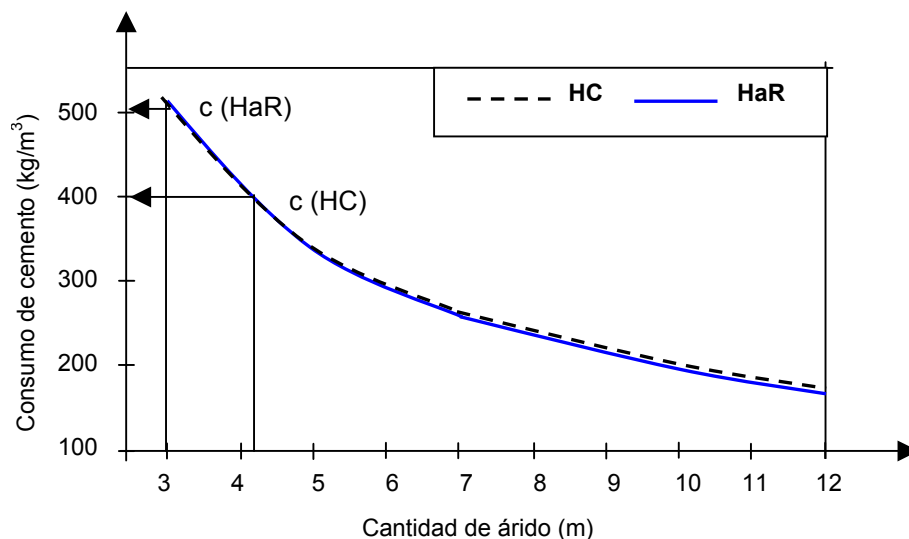


Figura 5.- Leyes de Molinari para hormigón convencional y reciclado

En la tabla 1 se presentan los coeficientes de las diferentes leyes de comportamiento presentadas en las figuras 4 y 5, para los dos tipos de hormigones : hormigones convencionales (HC) y hormigones con áridos reciclados (HaR). En ella  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$ ,  $K_6$  son constantes que dependen exclusivamente de los materiales (cemento y áridos). En dicha tabla la ley de Molinari, está dada para un valor fijado de



la cantidad de árido (m), si bien se puede poner en función de dicha cantidad para una relación a/c definida que es lo que se representa en la figura 5.

Tipo de hormigón	Ley de					
	Abrams $f_c = K_1 e^{K_2 \times A/C}$		Lyse $m = K_3 \times A/C + K_4$		Molinari $C = K_5 \times A/C^{K_6}$	
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	K <sub>6</sub>
Hormigón convencional	129,78	-1,6168	12,885	-1,4588	1284,1	0,8237
Hormigón árido reciclado	109,13	-1,4732	11,953	-1,5578	1256,3	0,8158

*Tabla 1.- Coeficientes de las diferentes leyes estudiadas*

Por otro lado, la mayor porosidad del árido reciclado (aR) determina que el mismo presente una gran capacidad de absorción de agua, que a su vez delimita un rango de variación de la densidad en función del contenido de agua, siendo esta variación mucho mayor que en los áridos convencionales. En la producción de hormigón, las variaciones de densidad conducen a alteraciones en las proporciones de la mezcla, y consecuentemente en las propiedades del hormigón, además de alterar la producción.

El coeficiente de absorción efectivo representa la cantidad de agua que el árido reciclado absorberá desde el inicio de la mezcla hasta el final del fraguado. El conocimiento de este coeficiente permite un mejor ajuste de las correcciones de agua y árido en la producción del hormigón de árido reciclado, en las condiciones concretas de trabajo. El coeficiente de absorción efectivo puede variar mucho dependiendo fundamentalmente del grado de saturación del árido y del orden en que se introducen los materiales en la hormigonera.

El contenido de agua inicial del árido reciclado y el proceso de producción del hormigón influyen decisivamente en las características de la zona de transición mortero nuevo – árido reciclado y en consecuencia en las propiedades mecánicas y en la durabilidad del hormigón de árido reciclado.

La utilización de los áridos reciclados secos puede llevar a una zona de transición débil debido a la succión por parte del árido de agua y suspensión de cemento. Por otro lado, la utilización del árido reciclado 100% saturado, permite la movilización de agua de los poros del árido hacia la pasta de cemento, aumentando la relación agua /cemento y la porosidad de la pasta que toca el árido comprometiendo así las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón de árido reciclado Barra (1996).

#### Tesis doctoral Gómez-Soberón (2002a)

En esta tesis doctoral, se desarrolla un importante trabajo experimental, uno de cuyos objetivos principales es la caracterización del comportamiento diferido de los

hormigones con áridos reciclados (HaR). Tal como se ha visto, el uso de áridos reciclados como áridos para hormigones implica el incremento del contenido del mortero dentro de los HaR; y por tanto, la posibilidad de que aumenten las deformaciones diferidas.

En esta línea, los trabajos de Gómez-Soberón, *et al* (2003a), sobre el comportamiento de la retracción en Hormigón con áridos reciclado (HaR) han puesto de manifestación que el incremento de sustitución de áridos gruesos naturales por áridos reciclados es correlativo con el incremento de deformación por retracción que presentan los HaR. Los considerables incrementos de la retracción que se presentan en los HaR, tal como se muestra en la figura 6, responden a la alta porosidad y permeabilidad de los áridos reciclados de hormigón (ARC). A ello también contribuye, el aumento de la disponibilidad de agua libre y por ende de la posibilidad de su movimiento hasta alcanzar equilibrio hídrico con el medio que le rodea, hacen que la retracción de éstos se incremente.

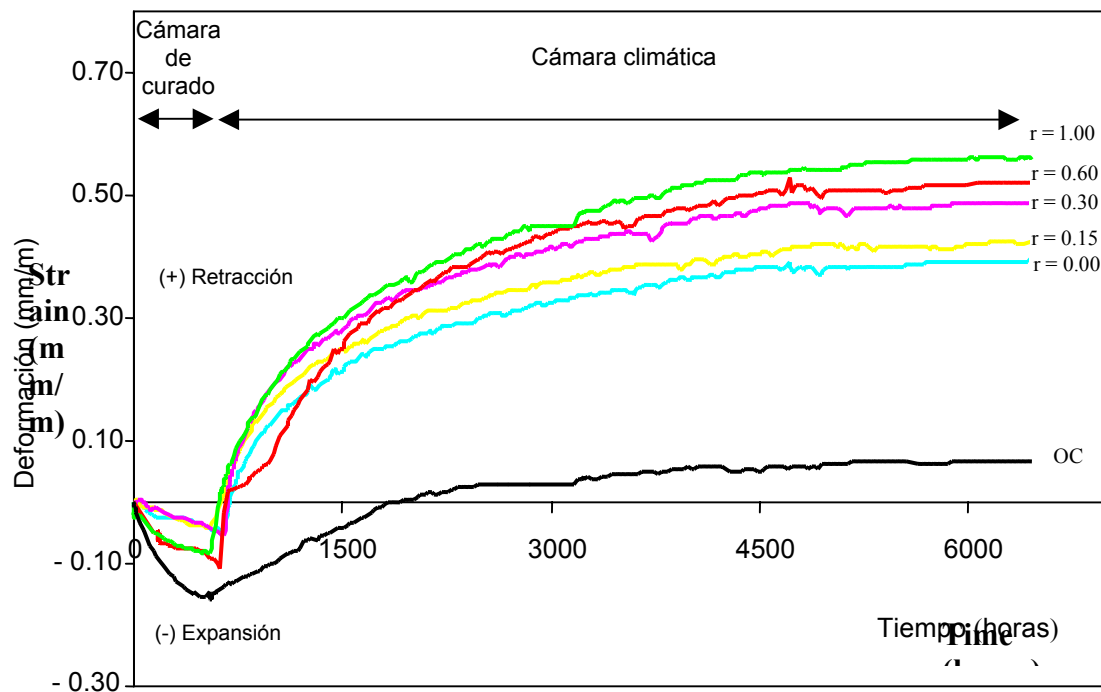


Figura 6.- Deformaciones por entumecimiento y retracción total

De este estudio, se remarcen los siguientes puntos:

1. Un contenido de árido reciclado por debajo del 30% en los Hormigones con áridos reciclados (HaR) parece ser seguro y factible sin uso de inhibidores de retracción.
2. El incremento en deformación por retracción de los HaR es imputable al mortero viejo adherido al árido natural; así como también, a su contenido, interconexión y distribución de sus tamaños de poros.

En los referente a los estudios efectuados de la deformación por fluencia de los Hormigones con áridos Reciclados (HaR), Gómez-Soberón *et al* (2003b), enfatizan en la aceptación de los mismos para el uso con fines estructurales, siempre y cuando se tengan en cuenta los parámetros e incrementos en los coeficientes de fluencia de forma adecuada para cada caso particular. Esto es, la evolución en el tiempo de la fluencia de los HaR, mostrada en la figura 7, es parecida a los hormigones usuales; sin embargo, los niveles de tensiones son menores al incrementar el factor  $r$ , y además, estas diferencias son más marcadas con el paso de la edad.

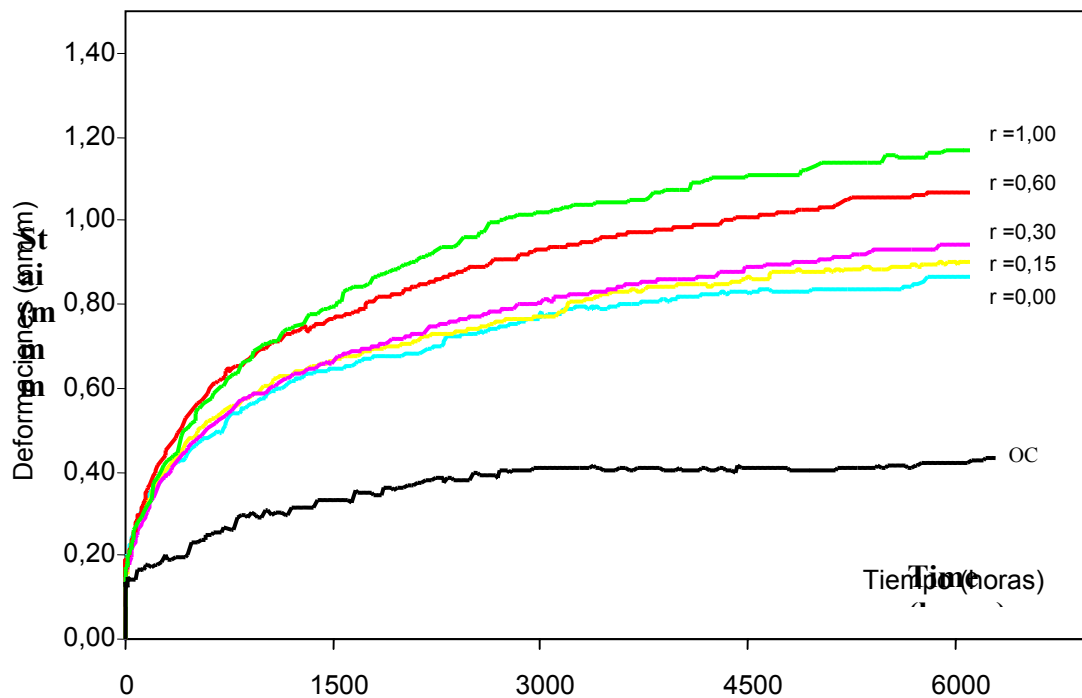


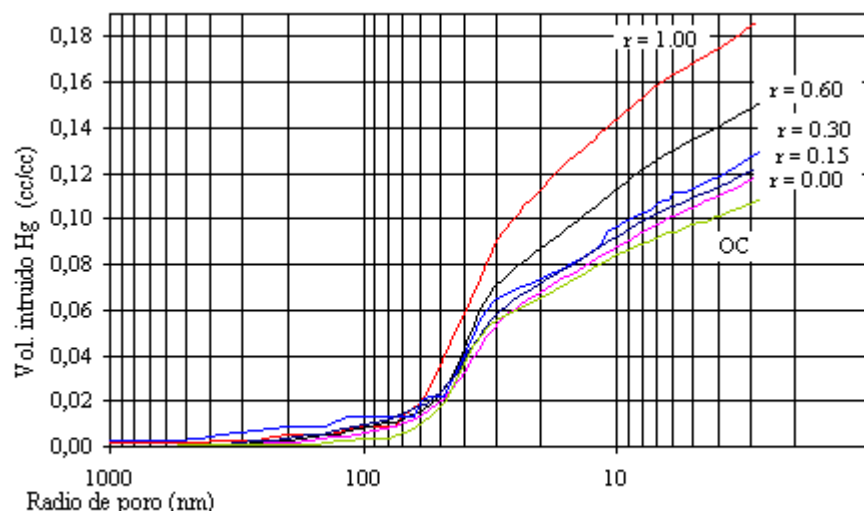
Figura 7.- Fluencia total para diferentes CR

Otro aspecto significativo, con evidentes consecuencias físicas, mecánicas y de durabilidad es la **porosidad**. Los hormigones reciclados tienen una mayor porosidad que los hormigones convencionales mostrando, en general, un comportamiento en el que las propiedades físicas y mecánicas decrecen a medida que aumenta los porcentajes de reemplazo de áridos naturales por áridos reciclados, Wainwright, *et al* (1993),

Los ensayos realizados, aplicando la técnica de porosimetría por intrusión de mercurio, por Gómez-Soberón (2002b) apuntan en esta dirección. Así, los resultados obtenidos en los mismos se han correlacionado con propiedades físicas y mecánicas de los HaR, poniendo en evidencia las siguientes cuestiones: el factor de reemplazo  $r$  de los HaR presenta una buena correlación con el volumen total y tamaño de sus poros, siendo más patente su influencia a edades jóvenes y reduciéndose al incrementar la edad. Dicha influencia se atribuye a la cristalización de nuevos productos que reducen el número y tamaño de estos poros.

Por otra parte, las diferencias más significativas de los especímenes estudiados se manifiestan en dos parámetros específicos, tal como se muestra en la figura 8. Estos parámetros son:

- 1º.- Umbrales de radio de poro mayores al incrementar el reemplazo de áridos naturales por áridos reciclados.
- 2º.- Detección de unas zonas de importantes cambios cuantitativos, marcadas por los incrementos en el volumen de los poros a partir de poros con radios menores a 30 nm.



*Figura 8.- Distribución general poros (7 días)*

En cuanto a los resultados obtenidos de la superficie específica, junto con la porosidad total, son los que mejor describen y correlacionan los resultados de las propiedades de los hormigones estudiados.

*Tesis doctoral Belén Gonzalez (2002)*

En esta tesis doctoral, se realizaron numerosos ensayos de caracterización de áridos reciclados<sup>2</sup> procedentes de deconstrucción (correspondientes a la fracción 6-12Rmm y 12-25Rmm) con el fin de establecer conclusiones sobre la adecuación o no de los áridos reciclados existentes en el mercado español a la fabricación de hormigones estructurales. Para ello se llevaron a cabo ensayos normativos de densidad, absorción, granulometría, coeficiente de forma, índice de lajas y dureza. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que, a pesar de que existen diferencias notables con los áridos convencionales, las características de los áridos reciclados son adecuadas para el objetivo. Las mayores diferencias se encuentran en las propiedades de densidad y absorción, siendo la densidad de los áridos reciclados inferior a la de los convencionales y su absorción muy superior.

Otro aspecto importante del citado trabajo (González, 2002), son los ensayos realizados para la caracterización de las propiedades básicas del hormigón. En ellos se establecieron parámetros de dosificación correspondientes a hormigones de prestaciones normales desde el punto de vista de propiedades mecánicas, trabajabilidad y durabilidad

<sup>2</sup> En esta tesis doctoral se sigue la nomenclatura de asignar una R a los áridos reciclados (áridosR)

(hormigón para armar sometido a una clase de exposición normal, con humedad media y consistencia blanda, características habituales en el campo de la edificación española). Con dichos parámetros se fabricó un hormigón convencional (HC) y un hormigón convencional con humo de sílice (incorporada en un 8% sobre el peso de cemento) (HCS), ambos de control, y a continuación se ajustó la dosificación para la fabricación de un hormigón con áridos reciclados (HaR) y un hormigón con áridos reciclados y humo de sílice (HaRS). El hormigón con árido reciclado sustituía el 50% de las fracciones gruesas convencionales por fracciones gruesas recicladas y el hormigón con árido reciclado y humo de sílice incorporaba además un 8% de dicha adición.

Los resultados obtenidos en estos hormigones muestran que los hormigones fabricados con incorporación de áridosR presentan valores de densidad en estado fresco y en estado endurecido inferiores a los de los convencionales. Igualmente se aprecia que la densidad de los hormigones que incorporan humo de sílice es inferior a la de los que no lo incorporan (HCS frente a HC y HaRS frente a HaR). En cuanto a los resultados de resistencias a compresión, estos indican que la sustitución del 50 % de las fracciones gruesas de áridos convencionales por áridos reciclados proporciona hormigones de características similares, presentando, a partir de los 7 días, una mayor resistencia los hormigones que incorporan humo de sílice frente a los que no lo hacen.

Tras el análisis de los resultados de resistencias a tracción indirecta se puede concluir que ni la incorporación de árido reciclado ni la de humo de sílice tienen especial influencia. Las resistencias de todos los hormigones, para las distintas edades, presentan escasas diferencias.

En todos los hormigones que incorporaban áridosR se ha constatado una disminución del módulo de deformación longitudinal  $E$ , influyendo levemente en este parámetro la adición de humo de sílice. En efecto, en todos los casos la rigidez a compresión es ligeramente superior en las mezclas HCS y HaRS en comparación a sus patrones HC y HaR.. Asimismo, la presencia de áridosR produce en los hormigones peores comportamientos frente a cansancio. La adición de humo de sílice tiene efectos beneficiosos en el control de dicho factor de forma que un HaRS puede ofrecer, bajo cargas mantenidas, mejores resultados.

Asimismo en la citada tesis se incluyen diversos ensayos sobre propiedades estructurales. Para ello, con los hormigones diseñados se fabricaron vigas de hormigón armado de sección rectangular. Para cada tipo de hormigón, se fabricaron cuatro vigas con distintas cuantías de armadura transversal que se ensayaron hasta rotura.

El diseño del ensayo se realizó de forma que la rotura se debiese principalmente a esfuerzos de cortante (viga biapoyada con dos cargas puntuales que proporcionan una ley de momentos trapezoidal), de forma que se pudiese estudiar el comportamiento de los nuevos hormigones frente a este esfuerzo y la influencia de las diferentes cuantías en dicho comportamiento. En la figura 9 se muestra la instrumentación utilizada en los ensayos y la configuración de los mismos.



*Instrumentación del hormigón.  
Galgas de roseta y  
unidireccionales*



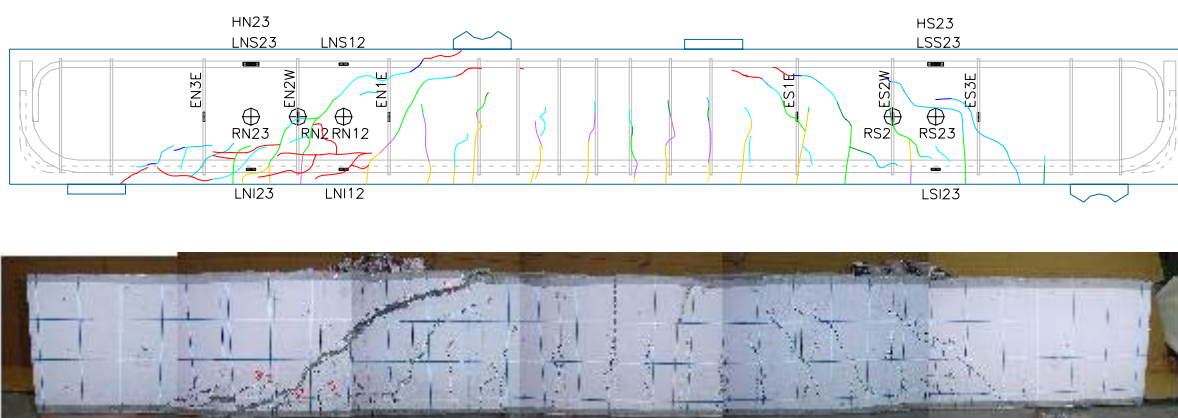
*Aspas con transductores de  
deformación por cortante*



*Trípodes con transductores de  
flecha y aspas con transductores  
de deformación por cortante*

*Figura 9.- Instrumentación utilizada en los ensayos*

Los resultados obtenidos mediante instrumentación (deformaciones del acero, del hormigón y flechas en cada escalón de carga), indican pequeñas diferencias de comportamiento entre los distintos hormigones, sobre todo en cargas últimas, diferencias que aumentan cuando se analiza la figuración en servicio. En la figura 10 puede verse, tanto el esquema de las fisuras producidas durante el ensayo de la viga V24HR como la fotografía correspondiente a la situación de rotura de la misma.



*Figura10.- Diagrama de fisuras y vista real de la fisuración y rotura de la viga V24HR*

Los resultados de la instrumentación se contrastaron con el programa Response que aplica la teoría de cortante del MCFT (Modified Compression Field Theory), obteniéndose que ésta caracteriza adecuadamente el comportamiento de todos los hormigones. También se realizó un contraste de los resultados con diferentes normativas (que aplican en general formulaciones empíricas), observándose que todas las normas presentan, en general, un carácter conservador y en especial de la EHE, siendo la formulación de la AASTHO (basada en la teoría del MCFT) la que mejor ajusta los resultados.

En la misma dirección que la tesis doctoral de B. González (2002), se está finalizando la tesis doctoral de M. Etxebarria, dirigida por los doctores A.R.Marí y E. Vázquez. Sí bien el planteamiento estructural es similar, difieren los aspectos metodológicos respecto al caso anterior. En este caso se ha preparado un hormigón de base (patrón) al que después se ha reciclado para constituir los áridos de partida del

hormigón reciclado. Los resultados redundan en la misma dirección que los señalados con anterioridad.

## **5.- CONCLUSIONES**

A la luz de lo anteriormente expuesto se pueden plantear, como conclusiones principales, las siguientes:

- Parece necesario visualizar el ciclo de vida que se constituye en un proyecto estructural, en consecuencia, debe cuantificarse la vida útil de la estructura, ya que la misma tendrá claras consecuencias en todas las etapas posteriores. El concepto de reponibilidad constituye un planteamiento interesante en esta dirección.
- Las potencialidades del hormigón estructural cara al futuro siguen estando muy claras. Ahora bien hay que ahondar en la conciencia social y profesional por los temas de sostenibilidad en el sector de la construcción. Los puntos de vista del análisis deben ser más globales y para una cuantificación rigurosa de los diferentes planos de requerimiento pueden utilizarse técnicas de análisis de valor.
- La tecnología hoy en día disponible para avanzar en los temas de sostenibilidad es, mayoritariamente, satisfactoria. La implantación real de estas vendrá dada por las directrices que surjan desde las primeras etapas del proceso (planificación, administración, promotores, etc).
- Los ensayos realizados sobre hormigones realizados con áridos reciclados procedentes de hormigón muestran la viabilidad de la utilización estructural de los mismos, con la consiguiente ventaja de disminución de empleo de recursos naturales. A la luz de los resultados mostrados se puede hacer una sustitución parcial de áridos naturales con variaciones poco significativas de las prestaciones
- El tratamiento normativo de los hormigones con áridos reciclados (HaR) puede ser similar al actual, enfatizando en el aspecto del árido reciclado. Parecería prudente incorporar este planteamiento en la nueva normativa, si bien, limitando el porcentaje de árido reciclado y requiriendo unas medidas de control de estos áridos.

## **Agradecimientos**

Los autores quiere expresar su agradecimiento a aquellos compañeros que han participado en diversos proyectos conjuntos que han permitido llegar a resultados, algunos de los cuales se muestran en el presente proyecto.

Asimismo quieren excusarse por adelantado, frente a algún olvido que se pueda haber producido en la referencia a trabajos realizados en los últimos años en esta dirección. Este olvido puede ser fruto de la ignorancia propia, de las limitaciones de espacio o bien por entender que se alejaban mucho de la parte principal del artículo.

## Referencias

Aguado, A. y Casanova, I. (1997). *Introducción. Capítulo 1 “Demolición y reutilización de estructuras de Hormigón”*. Ed GEHO-ATEP-Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 160 pp. Monografía nº E-7. Estructuras y Edificación

Aparicio Soto, G. (1999), *Establecimiento racional de la vida útil de las estructuras*. Rev. Carreteras. Extraordinario 1999. pp. 48-67. Asociación Española de la Carretera.

Barra, M. (1996). *Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado*. Tesis doctoral dirigida por el Dr. Enric Vázquez. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPC. Diciembre 1996

Cardim, A. (2001) *Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento. Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento*. Directores tesis: A. Aguado y A. Josa. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPC. Julio

Estévez, B., Aguado, A. and Josa, A. (2002). *Life Cycle Inventory of concrete recycling*. 10<sup>th</sup> LCA Case Studies Symposium “Recycling, close-loop economy, secondary resources”. Joint SETAC Europe and ISIE Meeting, Barcelona. 2-4 December.

García Meseguer, A. (1983) *Para una teoría de la calidad en construcción*. Rev Informes de la Construcción nº 328, pp.: 9-26. Nov.

Gómez-Soberón, J. M. V. (2002a), *Comportamiento tenso deformacional instantáneo y diferido de hormigón con árido reciclado* Directores de tesis: L. Agulló y E. Vázquez. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Barcelona. UPC. Octubre

Gómez-Soberón, J. M. V. (2002b), *Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study*. Cement and Concrete Research. Vol. 32, ISSN 0008-88-46, 8 pp. 1301-1311.

Gómez-Soberón, J. M. V., Vázquez E. and Agullo, L. (2003a) *The shrinkage of the concrete with substitution of the aggregates by recycled concrete aggregates*. ACI 5th International Conference. Innovations in Design with Emphasis on Seismic, Wind, and Environmental Loading; Quality Control and Innovations in Materials / Hot – Weather Concreting. Cancun, Mexico. (en imprenta)

Gómez-Soberón, J. M. V., Agulló, L. and Vázquez., E. (2003b). *The creep of the concrete with substitution of the aggregates by recycled concrete aggregates*. ACI 5th International Conference. Innovations in Design with Emphasis on Seismic, Wind, and Environmental Loading; Quality Control and Innovations in Materials / Hot – Weather Concreting. Cancun, Mexico. (en imprenta)

González, B. (2002). *Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificación, propiedades mecánicas y comportamiento estructura a cortante*. Tesis doctoral dirigida por el Dr. Fernando Martínez. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad da Coruña. Noviembre 2002



Grübl, W. (1999), *Environmentally friendly construction technology-interaction between construction and environment* <http://www.b-i-m-de/public/Tudmassiv/bacón98gruebl.htm>

Hansen, T. C. and Bøegh E., (1995) *Elasticity and drying shrinkage of recycle-aggregate*, ACI Journal, (5) 648-652.

LABEIN (2003), *Informe de prospectiva del sector de Obra Civil*. Observatorio de Prospectiva Industrial (OPTI). 50 páginas. Marzo

Lauritzen, E. K. and Jannerup, M. (1993), *Guidelines and experience from the demolition of houses in connection with the resound Link between Denmark and Sweden*. Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, in: Guidelines for Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, E. K. Lauritzen (Ed.), pp. 35-46.

Mora, P. (2002). *Retos de la industria del cemento para el desarrollo sostenible*. Encuentro internacional sobre Desarrollo Sostenible del cemento y del hormigón. CANMET / ACI / UPC. Barcelona. 4 noviembre.

Núñez, R y Aguado, A. (2003). *La gestión del conocimiento en el Sector de la Construcción*. IV Congreso Nacional de la Ingeniería Civil. Madrid, 26-28 de noviembre. Colegio Nacional de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Ormazabal, G. (2002) *El IDS: Un nuevo sistema integrado de toma de decisiones para la gestión de proyectos constructivos*. Director tesis: A. Aguado. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPC. Febrero

RUBAU (2002) *Gestión ambiental en la ejecución de obras*. Manuales de ecogestión nº 7. Ed. Construcciones RUBAU y Departament de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya. 239 páginas.

Wainwright, P. J. Trevorrow, A. And Wang, Yu Y. (1993), *Modifying the performance of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates*. Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, in: Guidelines for Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, E. K. Lauritzen (Ed.), pp. 319–330.